

Modelos numéricos para la simulación de incendios en túneles con ventilación semi transversal y trampillas de extracción*

Paloma Retana¹, Ingeniero Industrial

Alberto Fraile², Dr. Ingeniero Industrial

Ignacio del Rey¹, Ingeniero Industrial

Enrique Alarcón², Dr. Ingeniero de Caminos

1. Centro de Modelado en Ingeniería Mecánica (CEMIM)

2. ETS de Ingenieros Industriales de Madrid

El incremento experimentado por la construcción de grandes túneles ha provocado un renovado interés por el estudio de las diferentes situaciones de accidente que se pueden producir durante su vida de servicio. Entre ellos uno de los más complicados y peor conocidos es el caso de un accidente con fuego en el interior del túnel. Mediante el uso de un método numérico de volúmenes finitos este artículo presenta un estudio sobre las implicaciones del uso de trampillas de extracción de humos así como algunas conclusiones obtenidas tras el estudio de los resultados.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

La nueva red de carreteras es uno de los factores básicos de cohesión entre los países de la Unión Europea. Las estrictas condiciones impuestas en su proyecto para favorecer la rápida distribución de personas y bienes, tienen gran influencia en la construcción de túneles mayores y más largos que, además, sufren el paso de un número de vehículos en continuo crecimiento.

Este aumento de tráfico se ve acompañado por una demanda de confort y seguridad especialmente en lo que se refiere a la ventilación necesaria para mantener controlada la contaminación en el interior del túnel así como en las precauciones que deben establecerse para limitar el daño y las muertes que puedan surgir durante el desarrollo de un incendio.

En túneles urbanos, donde la contaminación provocada por el tráfico puede afectar al ambiente, tradicionalmente se ha tomado como factor dimensionante la situación de servicio en condiciones de intensidad

nominal. Sin embargo, la reducción en la emisión de contaminantes como consecuencia de reglamentos más estrictos ha inclinado la balanza hacia el escenario de fuego como el más necesitado de estudio. En medio urbano esa situación se complica en caso de tráfico saturado.

Puesto que esta condición "accidental" es independiente del tráfico que cruza el túnel (salvo a efectos de las filosofías de actuación sobre los sistemas de ventilación) se concluye que esta situación es la condición dimensionante del sistema.

Existe una larga tradición en el estudio de estos temas que puede seguirse en la serie de Conferencias organizadas por la BHRA desde

1975 (ref. 1) o las recomendaciones preparadas por el Grupo de túneles de la PIARC (ref. 2). También es

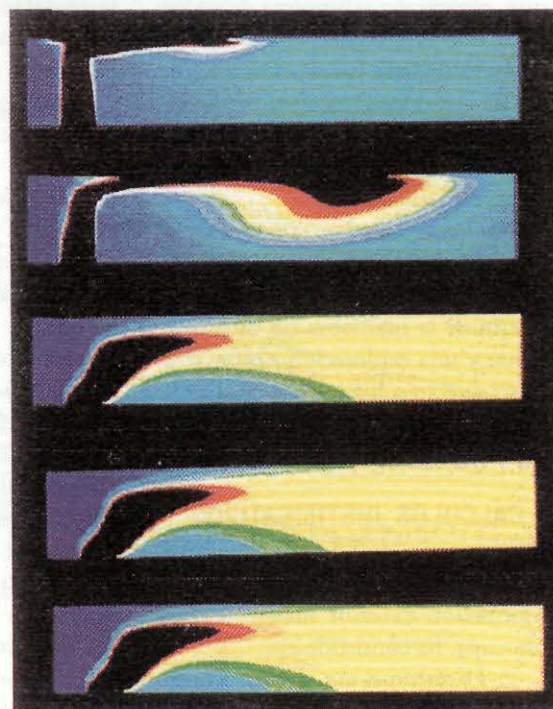


Figura 1.1. Concentración de humos del punto de emisión para $t = 10, 30, 12$ y 360 s y un caso estacionario

* Conferencia presentada en la VII Semana de la Ingeniería Industrial celebrada del 16 al 18 de marzo de 1999 organizada por la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid y la Universidad Politécnica de Madrid.

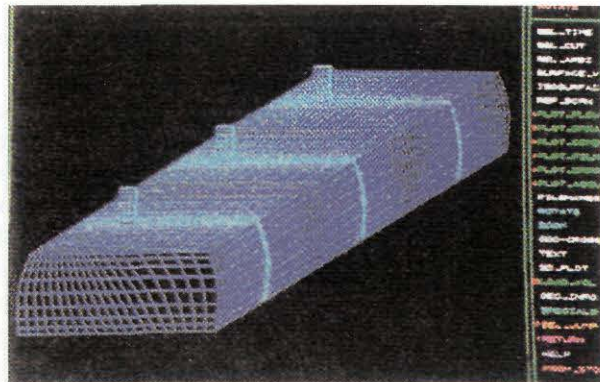
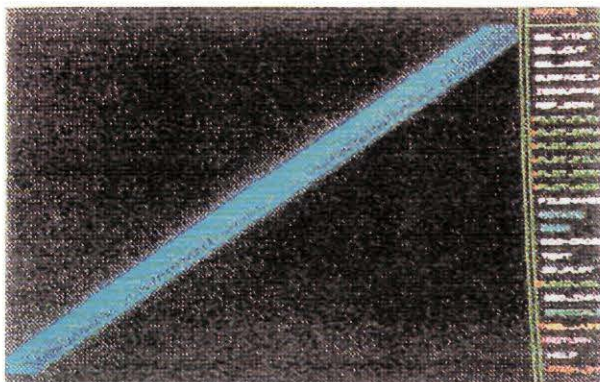


Figura 2.1. Modelo del dominio discretizado

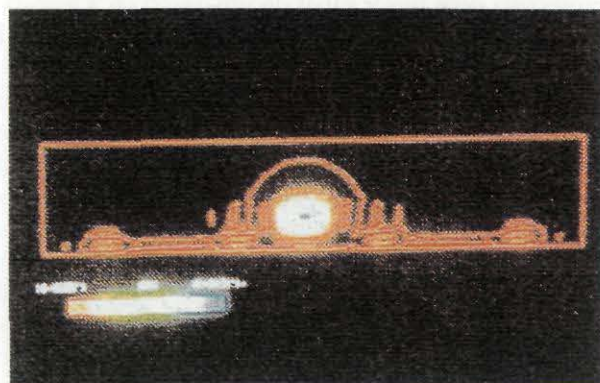
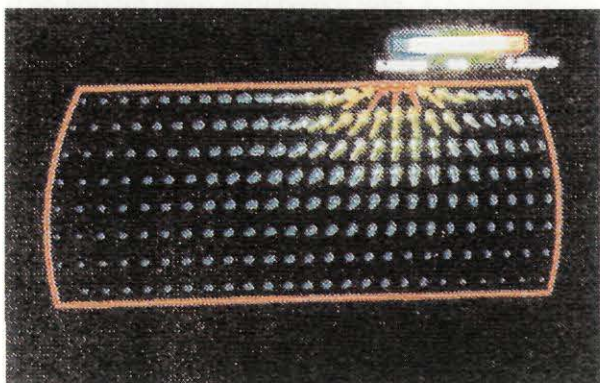


Figura 2.2. (a) Velocidad en sección transversal vertical con trampilla. (b) Isolíneas de velocidad en una sección horizontal

interesante observar que las Administraciones de diferentes países están promoviendo la publicación de normas (ref. 3) o Conferencias técnicas (ref. 4,5) para controlar las condiciones de seguridad durante la vida de los túneles.

Una tendencia que puede observarse en el estudio de fuegos es el uso de modelos físicos, bien a escala natural (Hacar, ref. 6) o reducida (Lacroix, ref. 7) con objeto de comprender el comportamiento de los humos o de los artificios imaginados para controlarlos. Sólo recientemente (con la disponibilidad de ordenadores más potentes y métodos de cálculo más fiables) se han comenzado a utilizar modelos numéricos para la investigación y no es difícil predecir que, en el futuro, se aplicarán de forma rutinaria al proyecto de nuevos túneles.

Como ejemplo, la figura 1.1. (tomada de la referencia 8) muestra la evolución de los contaminantes en un túnel. El fuego comienza en una situación de aire en reposo y, cinco segundos después, se activan los ventiladores longitudinales hasta que se

establece un flujo final de 2 m/s. La figura indica el penacho y la distribución de humos para diferentes instantes. (10, 30, 120, 360 e ∞ segundos).

Este tipo de cálculo es típico para un túnel con ventilación longitudinal en que los ventiladores aceleran la corriente de aire de modo que todos los usuarios aguas arriba del fuego puedan escapar a pie mientras los vehículos aguas abajo continúan su marcha hasta que abandonan el túnel, es decir, los productos de la combustión son forzados a moverse en la misma dirección del tráfico.

Ello significa que el método es muy efectivo para túneles de un solo sentido mientras que, para el caso de doble sentido o en los túneles urbanos con tráfico congestionado, deben tomarse otras providencias. Un método típico para estos casos es el uso de la llama da ventilación "semi transversal" en la que se establece un falso te-

cho que divide la sección transversal en una zona de paso de tráfico y otra superior usada como conducto para suministrar aire fresco a través de boquillas reguladas de forma que produzcan desniveles adecuados de presión y permitan inyectar los volúmenes de aire necesarios para reducir la proporción de contaminantes hasta niveles admisibles. El túnel

se subdivide en intervalos o cantones de unos 1.000 m cada uno de los cuales se ventila independientemente.

En caso de fuego, la filosofía de actuación consiste en concentrar los humos en una zona pequeña ex-

trayendo los contaminantes mediante trampillas controladas que se hacen funcionar tan pronto como se detecta el fuego. Por ejemplo, supóngase que los aceleradores longitudinales producen un flujo de 2 m/s. Si se necesitan tres minutos para reaccionar, habrá 360 m llenos de humo cuando se

«el método es muy efectivo para túneles de un solo sentido»

abran las trampillas. Para limitar su extensión se toman dos medidas: apertura de todas las trampillas situadas en esa distancia cerca del fuego e inyección de aire fresco desde los cantones vecinos.

Este esquema general admite varias alternativas según las distintas combinaciones posibles de boquillas y trampillas. En cualquier caso, el proyectista debe tomar varias decisiones esenciales entre las que se encuentran las dimensiones de las trampillas; su interdistancia; cuántas, cuándo y dónde deben ser abiertas e incluso las actuaciones para contrarrestar la propagación de los humos, es decir, decidir si es preferible reducir el flujo longitudinal que permite mantener una cierta estratificación en los humos (de modo que sea posible evacuar a los usuarios utilizando la capa de aire fresco situada en la parte baja del túnel) o bien, si se decide in-

yectar aire fresco que limita la extensión del incendio pero rompe la estratificación provocando una mezcla en la sección completa del túnel.

Este artículo es una contribución al estudio de alguno de esos problemas y pretende mostrar las enormes posibilidades que ofrece la dinámica de fluidos computacional (CDF) para las aplicaciones prácticas.

2. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

El estudio se ha llevado a cabo para el túnel de Somport. La sección transversal tiene un área de 51 m^2 , dedicándose 13 m^2 a la zona situada sobre el falso techo.

Según las recomendaciones de PIARC, se trata de evacuar $60 \text{ m}^3/\text{s}$ de humos producidos por un incendio de alrededor de 20 MW abriendo las trampillas e inyectando aire fresco, desde los cantones vecinos, a través de la sección dedicada al tráfico.

Se admite que el flujo se simule mediante las ecuaciones de balance de masa, cantidad de movimiento, energía cinética turbulenta y de su tasa de disipación, con un modelo de cierre del tipo $k - \epsilon$.

La combustión se modela suponiendo una reacción de velocidad infinita lo que permite el cálculo de las concentraciones de oxígeno, combustible y productos como función de la fracción másica de un elemento no reactivo que toma el valor unidad cuando sólo hay combustible y cero cuando la concentración de combustible es nula. Tal elemento se denomina escalar pasivo o fracción de mezcla (Crespo et al. Ref. 8) y para definir su comportamiento se necesita añadir una nueva ecuación al sistema.

Si se admite que las pérdidas caloríficas son un porcentaje fijo del calor de combustión, la tempera-

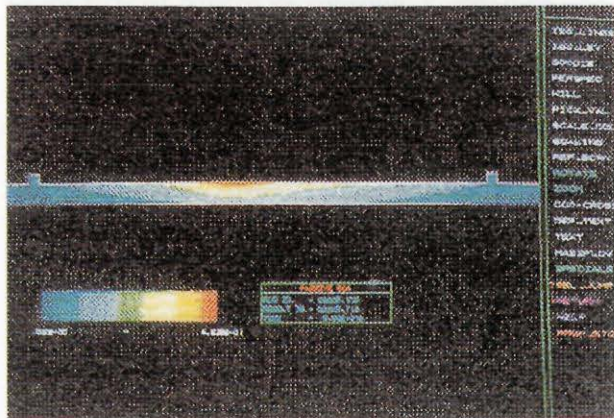


Figura 3.1. (a) Concentración de humo bajo trampilla

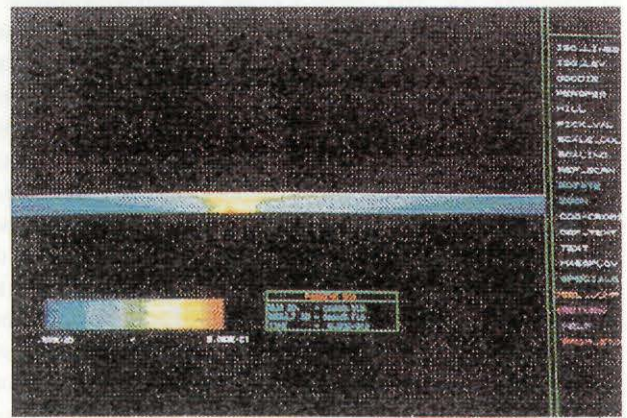


Figura 3.1. (b) Concentración de humos en el eje del túnel

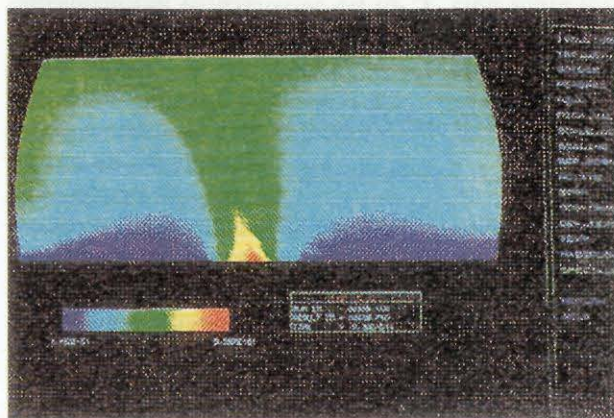


Figura 3.2. (a) Concentraciones en el emplazamiento del fuego

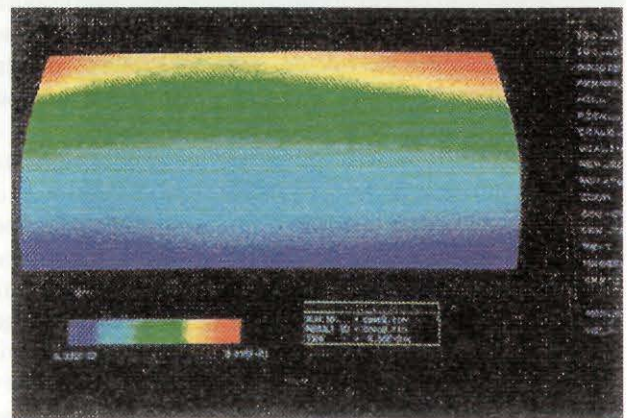


Figura 3.2. (b) Concentración a 25 m de la trampilla

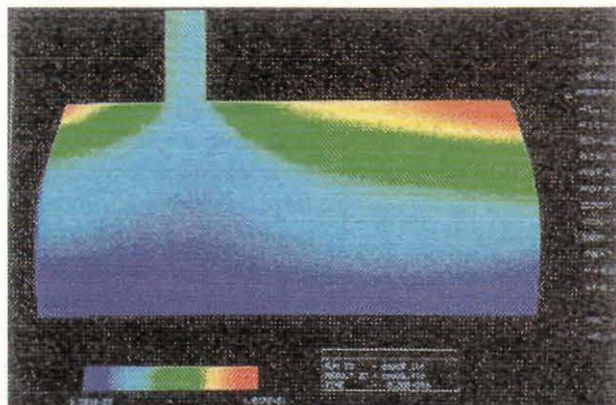


Figura 3.3. (a) Concentración en una sección de la trampilla

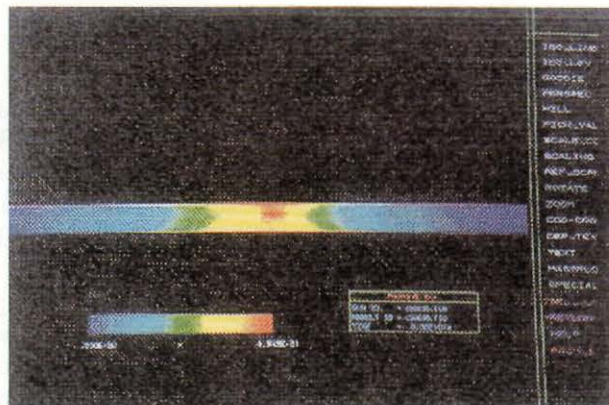
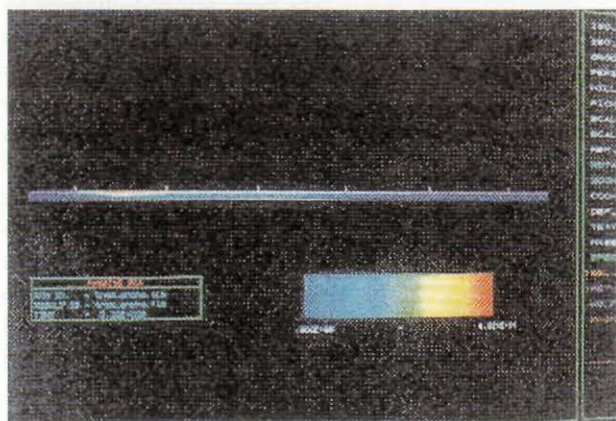
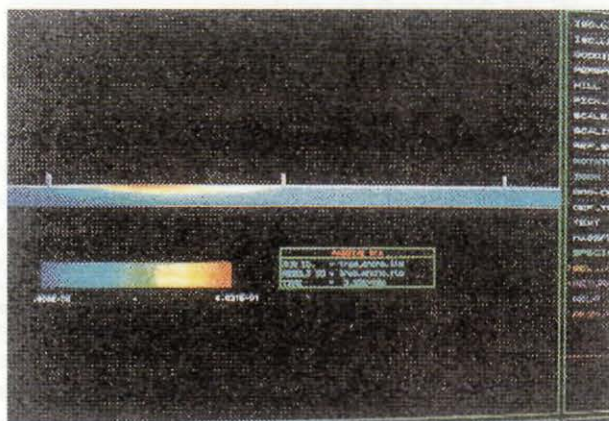


Figura 3.3. (b) Distribución en planta a 4 m de altura



3.4 (a)



3.4 (b)

Figura 3.4. Concentraciones para trampillas separadas 50 metros

tura resulta ser función del escalar pasivo.

El área de fuego es de 4 m^2 y está situada en la calzada del túnel. Se han estudiado diferentes emplazamientos pero aquí sólo se muestran los resultados correspondientes a la producción de un incendio en el eje del túnel y entre dos trampillas. Con un caudal emitido de $60 \text{ m}^3/\text{s}$ y una temperatura absoluta de 1.400 °K , la potencia es de aproximadamente 25 MW lo que está dentro de los órdenes de magnitud recomendados por PIARC para el accidente de un autobús.

Desde el punto de vista del modelo, con objeto de reducir el esfuerzo de cálculo sólo se ha discretizado el área de tráfico y las trampillas de extracción se han reproducido añadiendo pequeñas chimeneas para crear un flujo desarrollado; por ejemplo la figura 2.1. muestra las 2.400 celdas utilizadas en un modelo de 300 m de longitud con trampillas de $2,5 \times 0,75 \text{ m}^2$. En este caso no se incluye-

ron en el modelo las boquillas puesto que estudios previos demostraron que el flujo durante el periodo de extracción estaba controlado sobre todo por las trampillas incluso en ausencia de fuego tal como puede verse en la figura 2.2.(b) que muestra las isolíneas de velocidad vertical en una sección horizontal del túnel.

*«los contaminantes
quedan confinados
al espacio entre
trampillas»*

3. ESTUDIOS PARAMÉTRICOS

Se han construido dos modelos principales. En uno de ellos (fig. 2.1.) se supone que, tan pronto como se produce el fuego se abren las trampillas. El objetivo consiste en ver la efectividad de cada una según su distancia al fuego.

En un segundo modelo, la longitud se incrementa hasta 600 m y se utilizan tres pasos sucesivos de cálculo: en el primero se crea un flujo longitudinal de 2 m/s hasta que se alcanza el régimen permanente; a continuación se desencadena el fuego y durante tres minutos se deja que los humos se propaguen por el túnel.

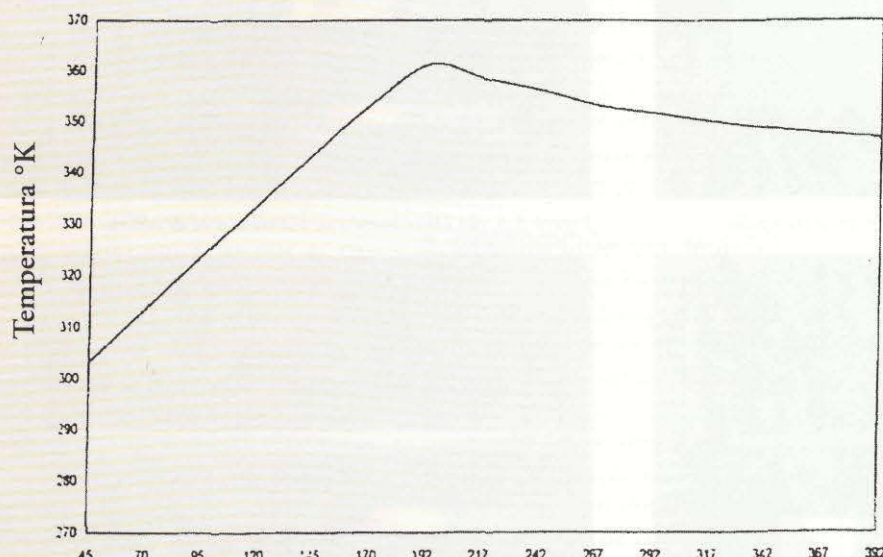
Finalmente, se abren las trampillas y se inyecta aire desde los extremos del tubo para contrarrestar el flujo.

3.1. Apertura instantánea de las trampillas

En este caso, para forzar el flujo, se colocan ambos extremos del modelo a la misma presión (1 bar) mientras que en las chimeneas se impone una succión de 250 Pa . Las condiciones de régimen permanente se consiguen tras alrededor de $1'5$ minutos.

Las figuras 3.1., 3.2. y 3.3. muestran la concentración de humos. En la 3.1. (a) se observa claramente que sólo las dos trampillas más próxi-

Temperatura media en el túnel



mas participan activamente en el proceso de extracción. En la figura 3.2. puede verse el penacho del incendio así como la estratificación en una sección entre el fuego y la primera trampilla. En la 3.3.(a) aparecen las concentraciones bajo la segunda trampilla con dos áreas en las esquinas (que probablemente desaparecerían si las boquillas estuvieran abiertas) así como un efecto de pinzamiento en el flujo que sale por la trampilla.

La figura 3.3. (b), que es una representación desde un punto de vista cenital, muestra de nuevo limitación de la zona ocupada por el humo.

La conclusión principal que puede obtenerse de estos estudios es que los contaminantes quedan confinados al espacio entre trampillas y que las más alejadas extraen el aire limpio que entra desde los extremos del túnel. La velocidad del aire al pasar por las trampillas es relativamente alta (superior a 24 m/s) por lo que podría ser aconsejable aumentar sus dimensiones o reducir la distancia entre ellas.

Para estudiar esta última posibilidad se ha construido otro modelo reduciendo la distancia entre trampillas a 50 m. La figura 3.4. contiene un ejemplo de los resultados obtenidos.

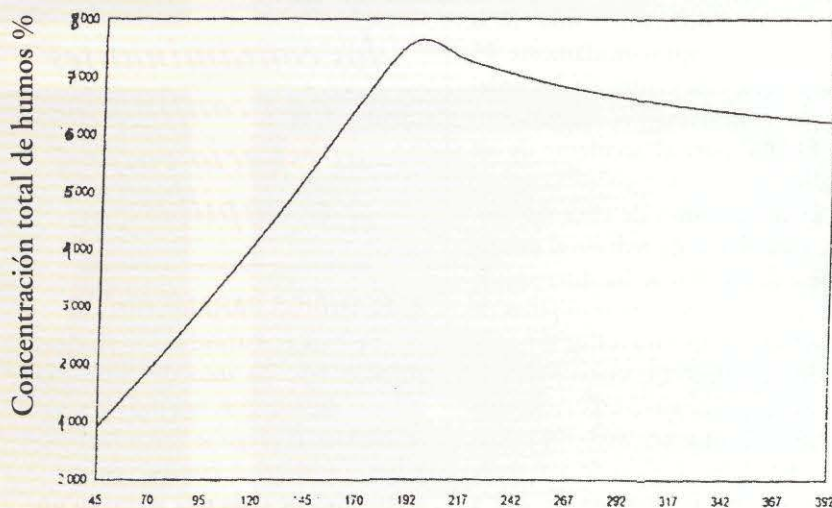
En 3.4. (a) se da una sección longitudinal global mientras que 3.4. (b) contiene un detalle de la zona de fuego. Puede verse que ahora hay cuatro

trampillas que funcionan activamente en la extracción del humo. Si se llama "efectividad" al índice entre el humo extraído y el producido. Empezando por la izquierda, se han obtenido los siguientes valores: 12 %, 24,5 %, 31,3 %, 11,2 %, 0%, 0% es decir, sólo 200 m son realmente efectivos en el proceso de evacuación de humos lo que permite recomendar que sólo se abran entre cuatro y cinco trampillas para la extracción localizada.

3.2. Retraso en la apertura de trampillas

Como se indicó más arriba, en este caso se ha tratado de modelar una situación mas realista. En primer lugar se han modelado 600 m de un túnel que contiene cinco trampillas separadas entre sí 100 m. Mediante un calculo preliminar se establece una corriente de aire de 2 m/s que se considera representativa de la situación de servicio. A continuación se activa el fuego entre las dos primeras trampillas (fig. 3.5.)

Evolución temporal de la concentración de humos en el modelo de 600 m



Durante tres minutos el humo llena el túnel y, a continuación, todas las trampillas se abren simultáneamente estableciéndose una corriente de aire para limitar la extensión de humos. Las figuras 3.6. (a) y 3.6. (b) muestran respectivamente la evolución de la concentración total de humos en el túnel y la temperatura media a lo largo del tiempo. Como puede verse, a un incremento prácticamente proporcional sigue una lenta disminución tras la apertura de trampillas observándose que, tras alrededor de 1'5 minutos, se alcanza prácticamente el régimen permanente en forma semejante a lo observado en casos anteriores. Pueden observarse también súbitos incrementos de concentración en las secciones 2 y 3 al encender el fuego, lo que muestra el importante papel jugado por ellos en el proceso de eva-

cuación. Por contra, la de la sección 5 permanecerá inalterable como si la apertura de trampillas no alterase su efectividad. La trampilla 1 nunca contribuyó a la evacuación de humos.

Ello significa que sólo son efectivas las trampillas aguas abajo del fuego y que, como máximo, solo tres trampillas, es decir, alrededor de 250 m, necesitan ser abiertos.

4. CONCLUSIONES

Este artículo ha tratado de mostrar las posibilidades del tratamiento numérico en problemas de importancia práctica para los que las recomendaciones contenidas en las Normas actuales no están totalmente apoyadas por la experimentación o el cálculo.

Aunque el esfuerzo computacional es enorme, resulta posible detec-

tar la eficacia del procedimiento propuesto y utilizar el modelo variando las condiciones de contorno para ver las filosofías aplicables a la explotación en servicio del túnel.

Respecto al problema particular tratado, está claro que la costumbre actual de abrir todas las trampillas contenidas en 500 m no introduce ventaja alguna respecto a la apertura de solamente las situadas en las proximidades del fuego (250 m). Parece también que una distancia de 100 m entre trampillas no conduce a una solución óptima y que sería preferible reducirlas a 50 m para conseguir una extracción más rápida.

Por otro lado, el estudio del modelo grande ha demostrado que, aunque las trampillas son muy efectivas, la impulsión de aire desde los extremos del túnel destruye la estratificación del humo. ■